

УДК 656.13

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА НАСЕЛЕНИЕ ГОРОДОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Б.В. Гавкалюк, кандидат технических наук, доцент;

И.А. Онищенко.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Описывается метод экспериментально-расчетного прогнозирования и мониторинга чрезвычайного воздействия автотранспорта на население городов Арктической зоны, учитывающий экстремально высокие выбросы загрязнителей на режимах пуска и прогрева двигателя и выпускной системы в условиях отрицательных температур. Кроме того, представлены результаты его апробации на примере определения количественных характеристик эмиссии угарного газа, углеводородов и оксидов азота современными легковыми дизельными и бензиновыми автомобилями экологических классов Евро 3 – Евро 5 в климатических условиях Арктики.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, Арктическая зона, загрязнение воздуха, автотранспорт, экстремальные климатические условия

METHOD FOR FORECASTING AND MONITORING THE EMERGENCY IMPACT OF VEHICLES ON THE POPULATION OF CITIES IN THE ARCTIC ZONE

B.V. Gavkaluk; I.A. Onischenko.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article describes a method of experimental and computational forecasting and monitoring of the emergency impact of vehicles emissions on the population of the cities of the Arctic zone. It takes into account extremely high emissions of pollutants at cold start and warm up at extremely low ambient temperature. In addition, the paper presents the results of its approbation, namely, determining the quantitative characteristics of the emission of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides by diesel and gasoline Euro 3 – Euro 5 passenger cars in the Arctic climate.

Keywords: emergency, Arctic zone, air pollution, road transport, extreme climatic conditions

Природные условия Арктики сами по себе оказывают негативное влияние на здоровье населения. Суровый климат, экстремально низкая температура окружающей среды, экстремально низкая инсоляция («световой голод») во время полярной ночи вызывают истощение организма человека, сужение его пределов толерантности. Дополнительное негативное воздействие, оказываемое на население загрязнением воздушной среды, усугубляет риск преждевременного развития патологических изменений и может приводить к преждевременной смертности [1–3].

Загрязнение атмосферы урбанизированных территорий Арктики связано, главным образом, с деятельностью тяжелой и горнодобывающей промышленности. В то же время в последние два десятилетия существенно выросла роль автотранспорта, о чем свидетельствуют количественные показатели качества воздуха по уровню загрязнения основными загрязнителями [4, 5]. В г. Мурманске в 2018–2019 гг. зимой имели место

превышения концентрации оксидов азота и монооксида углерода до 2 ПДК_{МР}, и наблюдалась высокая среднемесячная концентрация бенз(а)пирена – 2,5 ПДК_{СС}. В г. Архангельске, согласно отчету [5], в зимний период 2019 г. концентрация NO₂ все время находилась на уровне 2 ПДК_{СС}, а в январе был зафиксирован чрезвычайно высокий уровень бенз(а)пирена – 13,9 ПДК_{МР}. Город Норильск постоянно входит в антирекордный список городов России с крайне высоким загрязнением атмосферного воздуха [5].

Анализ данных экспериментального мониторинга свидетельствует о том, что уровень загрязнения воздуха зимой значительно выше, чем летом. Это может быть связано с деятельностью предприятий теплоэнергетики и возрастанием автотранспортных выбросов в условиях низких температур.

Последняя из проблем, несмотря на свою актуальность, изучена слабо.

Разработка экспериментально-расчетного метода для мониторинга и прогнозирования чрезвычайного воздействия выбросов современных автомобилей на жителей городов Арктической зоны с учетом каталитической трансформации поллютантов оказалась актуальной и своевременной.

Предложенный метод учитывает зависимость снижения эффективности термokatалитических конверторов современных автомобилей на режимах пуска и прогрева двигателя и выпускной системы автомобиля от температуры окружающей среды, а также включает физико-математическую модель каталитической трансформации примесных компонентов отработавших газов, построенную на теоретических представлениях о переносе тепла и веществ, а также кинетической теории катализа.

Катализ складывается из процессов изменения вещества и энергетических характеристик системы. Он включает, с одной стороны, адсорбцию веществ в активном слое, последующую их каталитическую трансформацию, транспортировку продуктов реакции в пространство канала, а с другой стороны, теплопередачу от газа твердой фазе и, наоборот, теплоперенос, тепловыделение в результате экзотермических реакций превращения вредных веществ. В общем случае уравнения материального и энергетического баланса для реагирующих веществ могут быть представлена в следующих аналитических формах [6, 7]:

– в газовой фазе:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'}{\partial z^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + r'; \quad (2)$$

– в активном слое:

$$\frac{dC_{CO}}{dt} = \frac{k_{CO}C_{CO}(C_{O_2} + C_{O_{2,s}})}{F(c,T)}; \quad (3)$$

$$\frac{dC_{CH}}{dt} = \frac{k_{CH}C_{CH}(C_{O_2} + C_{O_{2,s}})}{F(c,T)}; \quad (4)$$

$$\frac{dC_{NO_X}}{dt} = \frac{k_{NO_X}C_{NO_X}}{F(c,T)}; \quad (5)$$

$$F(c,T) = (1 + K_1C_{CO} + K_2^2C_{CH})^2 \cdot (1 + K_2C_{CO}^2C_{CH}^2) \cdot (1 + K_4C_{NO_X}^{0.7}); \quad (6)$$

– адсорбция:

$$\frac{dC_{O_{2,s}}}{dt} = kC_{O_2}(C_S - C_{O_{2,s}}), \quad (7)$$

где a – коэффициент температуропроводности; C – концентрация вещества; D – постоянная диффузии; F – корректирующая функция; k – константа скорости реакции; K – постоянная

адсорбции; q' – теплота, выделяющаяся при каталитической реакции; g' – вещество, образующееся при каталитической реакции; t – время; T – температура; U, V, W – координаты скорости; x, y, z – пространственные координаты; s – адсорбция; S – состояние насыщения.

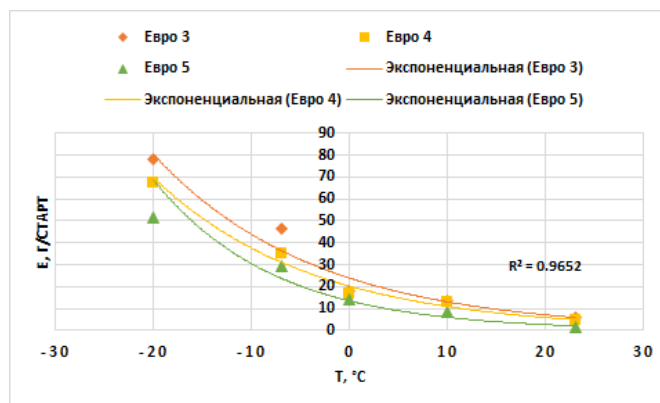
В уравнении (1) первый член отражает локальные изменения температуры, а в уравнении (2) – концентрации вещества в газовой фазе. При этом предполагается полный теплообмен между газом и промежуточным слоем, который определяет температуру пористой структуры. Следующие три слагаемых (2) представляют перенос вещества в потоке газа. Перенос перпендикулярно направлению потока осуществляется посредством диффузии (первые три слагаемых правой части). Последние слагаемые отражают массовые (2) и энергетические (1) изменения на поверхности активного слоя, в основе которых лежат экзотермические реакции.

Реакции превращения поллютантов протекают в каталитически активных центрах на поверхности промежуточного слоя. Химическому превращению предшествует адсорбция реагентов на поверхности катализатора. Скорость реакции зависит от распределения компонентов вещества на поверхности, которое, в свою очередь, зависит от десорбции продуктов реакции. Такое уравнение (2) выражает суммарный эффект от адсорбции, реакции и десорбции, который определяет локальную скорость реакции в активном слое.

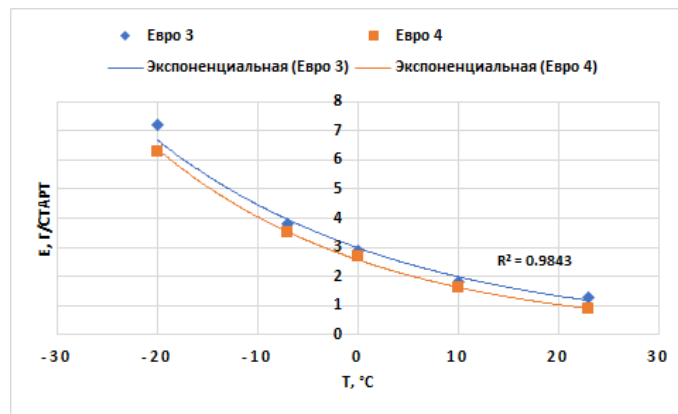
Уравнения (3–5) представляют выражения для скорости каталитической трансформации CO, CH и NO_x, выведенных на основе кинетики Лэнгмюра-Хиншельвуда; уравнение (6) – выражение для фактора ингибирования каталитического процесса; уравнение (7) – уравнение адсорбции кислорода.

Разработанная модель была верифицирована и оптимизирована по результатам экспериментальных исследований, в которых было задействовано 13 легковых бензиновых автомобилей экологических классов Евро 3, Евро 4 и Евро 5 и три легковых дизельных автомобиля Евро 3 и Евро 4. Измерения концентраций CO, CH и NO_x проводили с использованием соответствующего газоаналитического оборудования (газоанализаторов Testo-300 XXL (Testo/Германия), «Инфракар 10.02» (ООО «Альфа-динамика»/Россия) на автомобилях с холодными двигателями, находившимися в состоянии покоя до испытаний не менее шести часов при положительной температуре окружающей среды и не менее трех часов – при отрицательной. Измерения проводили при температурах наружного воздуха -20 °C, -7 °C, 0 °C, +10 °C, +23 °C. Каждую серию экспериментов повторяли от трех до пяти раз.

В качестве примера на рис. 1, 2 представлены результаты экспериментально-расчетной оценки влияния температуры окружающей среды на выбросы CO, CH с отработавшими газами (ОГ) легковых автомобилей экологических классов Евро 3 – Евро 5 при работе двигателя и выпускной системы в режиме пуска и прогрева.

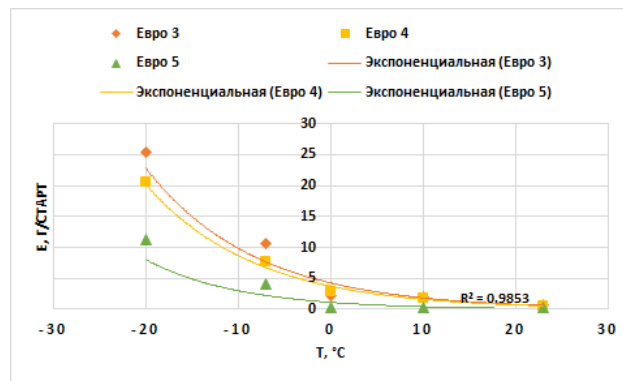


а)

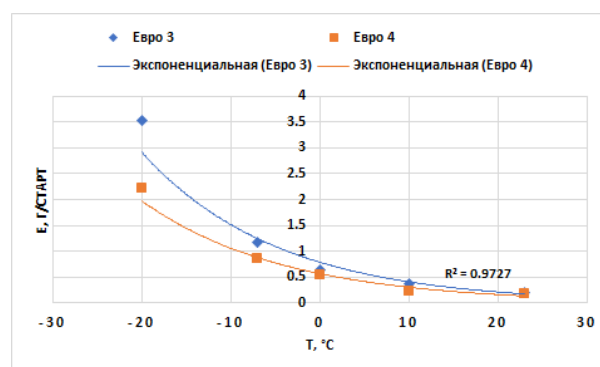


б)

Рис. 1. Эмиссия угарного газа, г/старт, бензиновыми (а) и дизельными (б) двигателями легковых автомобилей при пуске и прогреве двигателя и выпускной системы ОГ в зависимости от температуры наружного воздуха



а)



б)

Рис. 2. Эмиссия углеводородов, г/старт, бензиновыми (а) и дизельными (б) двигателями легковых автомобилей при пуске и прогреве двигателя и выпускной системы ОГ в зависимости от температуры наружного воздуха

Результаты проведенных экспериментально-расчетных исследований показали, что выбросы опасных компонентов современных бензиновых и дизельных легковых

автомобилей эффективно снижаются с помощью каталитических нейтрализаторов, за исключением режима холодного пуска и прогрева двигателя и выпускной системы ОГ. Эффективность каталитических нейтрализаторов в период старта и прогрева существенно зависит от температуры окружающей среды:

– для автомобилей с бензиновыми двигателями экологических классов Евро 3, Евро 4 и Евро 5 при температуре -20°C количество CO, эмитируемое за время прогрева двигателя, соответственно в 12,8, 14,9 и 34,5 раза выше, чем при температуре 23°C ;

– количество CH – выше в 35,6, 40,8 и 49,2 раза соответственно. В отличие от CO и CH, показатели выбросов NO_x в режиме пуска двигателя значительно в меньшей степени различались для экологических классов Евро 3 – Евро 5 и в значительно меньшей степени зависели от температуры наружного воздуха.

Для автомобилей с дизельными двигателями также прослеживалась тенденция роста выбросов CO, CH и NO_x по мере снижения температуры окружающей среды, но, ожидаемо, значительно менее выраженная – отношение показателей выбросов по CO, CH и NO_x при -20°C и 23°C составили соответственно 5,5–7,1, 13,7–16,7 и 4,5–4,8 раз.

Результаты расчета хорошо согласуются с собственными экспериментальными данными [8, 9] и данными, опубликованными в открытой печати зарубежными учеными [10, 11], что позволило их использовать при разработке официальных методических рекомендаций для расчетов загрязнения атмосферы, в том числе «Методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха», утвержденной приказом Минприроды России от 27 ноября 2019 г. № 804, зарегистрированной в Минюсте России 24 декабря 2019 г. № 56957 и вступившей в действие 6 января 2020 г.

Литература

1. Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Гавкалюк Б.В. Методические подходы контроля промышленной санитарно-гигиенической безопасности транспортных и стационарных дизельных установок в Арктике // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2 (50). С. 58–64.
2. Российский и международный опыт разработки планов действий по защите здоровья населения от климатических рисков / Б.А. Ревич // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 2. С. 176–181.
3. Ревич Б.А. Риски здоровью населения в «горячих точках» от химического загрязнения арктического макрорегиона // Проблемы прогнозирования. 2020. № 2 (179). С. 148–157.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 225 с.
5. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году: Государственный доклад // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/arkticheskaya-zona-rossiyskoy-federatsii/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy/> (дата обращения: 20.11.2020).
6. Ложкин В.Н., Онищенко И.А., Ложкина О.В. Уточненная аналитическая модель катализа отработавших газов в условиях низких температур // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2017. № 4. С. 78–85.
7. Ложкин В.Н., Онищенко И.А., Ложкина О.В. Расчетное исследование пожароопасных режимов работы каталитических нейтрализаторов в условиях Арктики // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 3. С. 7–14.
8. Ложкина О.В., Онищенко И.А. Анализ опасного загрязнения атмосферного воздуха крупных городов Арктической зоны отработавшими газами транспортных средств // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 3 (55). С. 20–26.
9. Ложкина О.В., Онищенко И.А. Методика оценки выбросов опасных компонентов отработавших газов при пуске и прогреве двигателей автотранспортных средств

в климатических условиях Арктики // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2020. № 3. С. 30–37.

10. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories // Atmospheric Environment. 2009. V. 43. P. 2419–2429.

11. Weilenmann M., 2005. Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold-start emissions at different temperatures // Atmospheric Environment. 2005. V. 39. P. 2433–2441.

References

1. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V., Gavkalyuk B.V. Metodicheskie podhody kontrolya promyshlennoj sanitarno-gigienicheskoj bezopasnosti transportnyh i stacionarnyh dizel'nyh ustanovok v Arktike // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2019. № 2 (50). S. 58–64.

2. Rossijskij i mezhdunarodnyj opyt razrabotki planov dejstvij po zashchite zdorov'ya naseleniya ot klimaticheskikh riskov / B.A. Revich [et al.] // Gigiena i sanitariya. 2020. T. 99. № 2. S. 176–181.

3. Revich B.A. Riski zdorov'yu naseleniya v «goryachih tochkah» ot himicheskogo zagryazneniya arkticheskogo makroregiona // Problemy prognozirovaniya. 2020. № 2 (179). S. 148–157.

4. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj Federacii za 2018 god. M.: Rosgidromet, 2019. 225 s.

5. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2017 godu: Gosudarstvennyj doklad // Ministerstvo prirodnih resursov i ekologii Rossijskoj Federacii. URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/arkticheskaya-zona-rossiyskoj-federatsii/sostoyanie-okruzhayushchej-sredy/> (data obrashcheniya: 20.11.2020).

6. Lozhkin V.N., Onishchenko I.A., Lozhkina O.V. Utochnennaya analiticheskaya model' kataliza otrabotavshih gazov v usloviyah nizkih temperatur // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2017. № 4. S. 78–85.

7. Lozhkin V.N., Onishchenko I.A., Lozhkina O.V. Raschetnoe issledovanie pozharoopasnyh rezhimov raboty kataliticheskikh nejtralizatorov v usloviyah Arktiki // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2016. № 3. S. 7–14.

8. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Analiz opasnogo zagryazneniya atmosfernogo vozduha krupnyh gorodov Arkticheskoy zony otrabotavshimi gazami transportnyh sredstv // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 3 (55). S. 20–26.

9. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Metodika ocenki vybrosov opasnyh komponentov otrabotavshih gazov pri puske i progreve dvigatelej avtotransportnyh sredstv v klimaticheskikh usloviyah Arktiki // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 3. S. 30–37.

10. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories // Atmospheric Environment. 2009. V. 43. P. 2419–2429.

11. Weilenmann M., 2005. Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold-start emissions at different temperatures // Atmospheric Environment. 2005. V. 39. P. 2433–2441.